



Suivi de l'évolution de la couverture détritique d'un glacier noir par photo-comparaison: le glacier d'Estelette (Massif du Mont Blanc)

Romain Mazué, Philip Deline, Martin P. Kirkbride

► To cite this version:

Romain Mazué, Philip Deline, Martin P. Kirkbride. Suivi de l'évolution de la couverture détritique d'un glacier noir par photo-comparaison: le glacier d'Estelette (Massif du Mont Blanc). Neige et glace de montagne : Reconstitution, dynamique, pratiques, Collection EDYTEM - Cahiers de Géographie, n°8, pp.171-178, 2009. halsde-00404051

HAL Id: halsde-00404051

<https://hal.science/halsde-00404051>

Submitted on 31 Mar 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Collection
EDYTEM

Numéro 8 - Année 2009

*Cahiers de
Géographie*

NEIGE et GLACE de MONTAGNE

Reconstitution, dynamique, pratiques



SUIVI DE L'ÉVOLUTION DE LA COUVERTURE DÉTRITIQUE D'UN GLACIER NOIR PAR PHOTO-COMPARAISON

LE GLACIER D'ESTELETTE MASSIF DU MONT BLANC

*SURVEY OF THE EVOLUTION OF A DEBRIS-COVERED GLACIER
BY COMPARISON OF PHOTOGRAPHS: GLACIER D'ESTELETTE (MONT BLANC MASSIF)*

ROMAIN MAZUÉ¹, PHILIP DELINE¹, MARTIN P. KIRKBRIDE²

¹ Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie/CNRS, Campus scientifique, F 73376 Le Bourget-du-Lac cedex.

² Geography, School of Social and Environmental Sciences, University of Dundee, Dundee DD1 4HN, Scotland UK.

Contact : rom1mazue@hotmail.com

RÉSUMÉ

Dans le cadre d'un programme de recherche sur les paramètres qui contrôlent l'évolution de la couverture détritique du glacier d'Estelette, une étude a été conduite à deux pas de temps : décennal depuis 1952 et annuel de 2006 à 2007. Par photo-comparaison d'aérophotographies, la rétraction (entre 1952 et 1993) puis l'extension (entre 1993 et 2006) de la couverture détritique ont pu être corrélées avec les phases d'avancée puis de retrait glaciaires contemporaines, et mesurées : son rapport à la superficie des 2/3 aval du glacier a oscillé entre un minimum de 31,1 % et un maximum de 52,2 %. L'étude comparative de photographies obliques terrestres a confirmé l'accroissement du détritisme supraglaciaire qui caractérisent le dernier demi-siècle, avec une augmentation des débris sur le glacier entre 2006 et 2007. Ces résultats confirment que le signal climatique enregistré par la dynamique glaciaire est le principal contrôle de l'extension de la couverture détritique, via l'intensité de l'ablation et la vitesse d'écoulement du glacier.

MOTS-CLÉS : ACTUEL, GLACIER NOIR, PHOTO-COMPARAISON, MASSIF DU MONT BLANC

ABSTRACT

As part of a research programme into the controls on the evolution of the supraglacial debris cover of Glacier d'Estelette, a study of debris cover extent has been conducted over two timescales, decennial and annual. By comparison of aerial photographs, a reduction (1952 - 1993) then extension (1993 - 2006) of the debris cover could be correlated with contemporary phases of glacier advance then retreat. Its proportion of the 2/3 glacier surface area has oscillated between 31.1% and 52.2%. A comparison of oblique terrestrial photographs has confirmed the increase of debris covered glacier which characterised the last half-century, with an increase of debris cover between 2006 and 2007. These results confirm that the climatic signal recorded by the glacier's dynamic response is the principal control on the extent of the debris cover, via the intensity of ablation and the glacier velocity.

KEYWORDS: PRESENT-DAY, DEBRIS-COVERED GLACIER, COMPARISON OF PHOTOGRAPHS, MONT BLANC MASSIF

INTRODUCTION

De nombreux glaciers des Alpes ou d'autres chaînes de montagnes présentent aujourd'hui une surface partiellement couverte par une couche de débris rocheux. Ces glaciers noirs, dont l'essentiel de la surface de la zone d'ablation est recouverte de débris hétérométriques sur une épaisseur décimétrique à pluridécimétrique, présentent une dynamique différente de celle des glaciers blancs. En effet, à cause de la protection offerte par les débris vis-à-vis de la radiation solaire, la glace est soumise à une ablation moins intense. L'effet positif engendré sur le bilan de masse se traduit par un décalage temporel et une amplitude plus faible des fluctuations du front (Smiraglia *et al.*, 2000). L'abondance du matériel détritique transporté par le glacier au niveau supraglaciaire entraîne également la formation de complexes morainiques hypertrophiés.

Dans le contexte du réchauffement climatique depuis la fin du Petit Âge Glaciaire (*i.e.* 1850), le nombre des glaciers noirs s'accroît (D'Agata et Zanutta, 2007) : des glaciers encore largement blancs dans les années 1960 et 1970, comme ceux de Gébroulaz (Vanoise) ou d'Argentière (massif du Mont Blanc), ont vu se développer dans leur secteur frontal une couverture détritique supraglaciaire depuis la fin des années 1980, tandis que des glaciers déjà noirs ont vu leur couverture s'étendre et devenir plus continue. La compréhension de cette dynamique est donc importante, car les glaciers représentent une ressource en eau, voire patrimoniale, majeure pour les territoires de montagne, tandis que les aléas qu'ils engendrent peuvent constituer un risque pour les communautés voisines.

Pour mieux comprendre la formation et l'évolution d'une couverture détritique supraglaciaire en relation avec les paramètres glaciologiques (vitesse superficielle du glacier, taux d'ablation de la glace, pendage et densité des bandes de débris intraglaciaires), une étude a débuté en 2004 sur le glacier d'Estelette (photo 1). Ce glacier du massif du Mont Blanc (figure 1) a été choisi comme site-atelier en raison de sa taille modeste (*c.* 0,63 km² en 2006), de sa structure simple, de son accès aisé, de la possibilité d'un hébergement à proximité, de l'existence d'une station météorologique automatique très proche, et de la qualité et la variété de ses caractéristiques glaciologiques.

En complément des activités scientifiques menées depuis 2004 (Kirkbride et Deline, en préparation), la méthode de photo-comparaison a été retenue pour quantifier l'évolution de la surface du glacier d'Estelette, en particulier de sa couverture détritique, à deux échelles temporelles :

- l'échelle du demi-siècle, grâce aux aérophotographies disponibles à partir de 1952, permet de suivre cette évolution au cours d'une avancée glaciaire (jusqu'au milieu des années 1980) puis d'un retrait glaciaire (depuis 20 ans) ;
- l'échelle annuelle, à partir de photographies prises de manière répétée depuis une station sur la moraine latérale droite, permet d'étudier à grande échelle les changements – par exemple le développement des bandes de débris. La première série de données procure alors le contexte sur le long terme pour l'instantané que représente la seconde série.

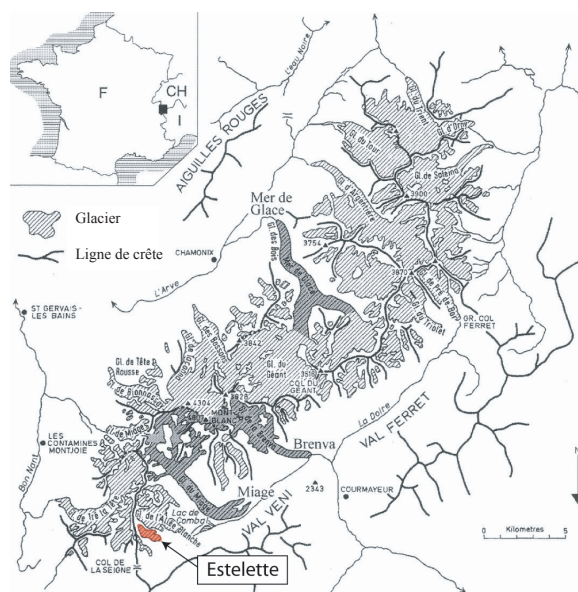


Figure 1 - Localisation du glacier d'Estelette dans le massif du Mont Blanc. En gris, les trois principaux glaciers noirs du massif (Deline, 2005).

Photo 1 - le glacier d'Estelette (versant italien du massif du Mont Blanc). A droite, le bassin du glacier de la Lex Blanche.

I - MÉTHODES

L'analyse des couleurs d'une photographie d'un glacier noir permet de distinguer, à l'échelle du pixel, les différences d'état de sa surface : glace, neige, couverture détritique, avec une précision dépendante de la résolution de l'image. La comparaison d'une série chronologique de photographies verticales aériennes et obliques terrestres du glacier d'Estelette permet *al.*rs un suivi de l'évolution de sa couverture de débris. Cette comparaison nécessite toutefois un prétraitement des images.

1 - Prétraitement des images

a - Aérophotographies : orthorectification et délimitation des surfaces englacées

Le processus d'orthorectification permet de redresser une photographie aérienne pour la rendre superposable à un fond cartographique. Cette opération corrige les déformations de la photographie liées à la projection de l'axe optique (non perpendicularité), aux effets du relief de l'objet photographié et à la projection conique (le plus souvent centrale). La reconnaissance de points communs (amers) à l'aérophotographie et à un modèle numérique de terrain (MNT) permet le redressement de celle-ci grâce aux informations altimétriques contenus dans celui-ci. La qualité du résultat dépend du nombre d'amers et de leur répartition spatiale. L'image résultante, appelée orthophotographie, peut alors être géoréférencée dans un système de coordonnées. Il devient possible de procéder à des calculs de surface, de distance, et de comparer des images entre elles. Les orthophotographies réalisées pour la comparaison (figure 2) se basent sur les aérophotographies de 1952 (IGN), 1968 (IGM), 1979 (IGN), 1993 (IGN), 2003 (RAVA), 2006 (IGN) (Le Roy et Deline, 2009), un MNT à 10 m et une orthophotographie de 1998-99 (Ortofoto IT2000).

En milieu de haute montagne, l'orthorectification est soumise à des contraintes supplémentaires : le relief accentue les déformations sur le cliché aérien brut, les surfaces englacées et/ou enneigées peuvent subir des variations altimétriques entre deux prises de vue, et enfin l'effet d'ombre du relief masque le terrain. En raison de ces contraintes, certaines orthophotographies n'intègrent pas le secteur amont du glacier. En revanche, la partie aval du glacier, objet de l'étude, bénéficie de nombreux amers dans la marge pro- et juxtaglaciaire : blocs rocheux, sentiers, crêtes morainiques, qui facilitent l'orthorectification.

La délimitation des surfaces englacées est gênée par la neige et par l'apparence similaire de la couverture détritique et de la marge proglaciaire. Cependant,

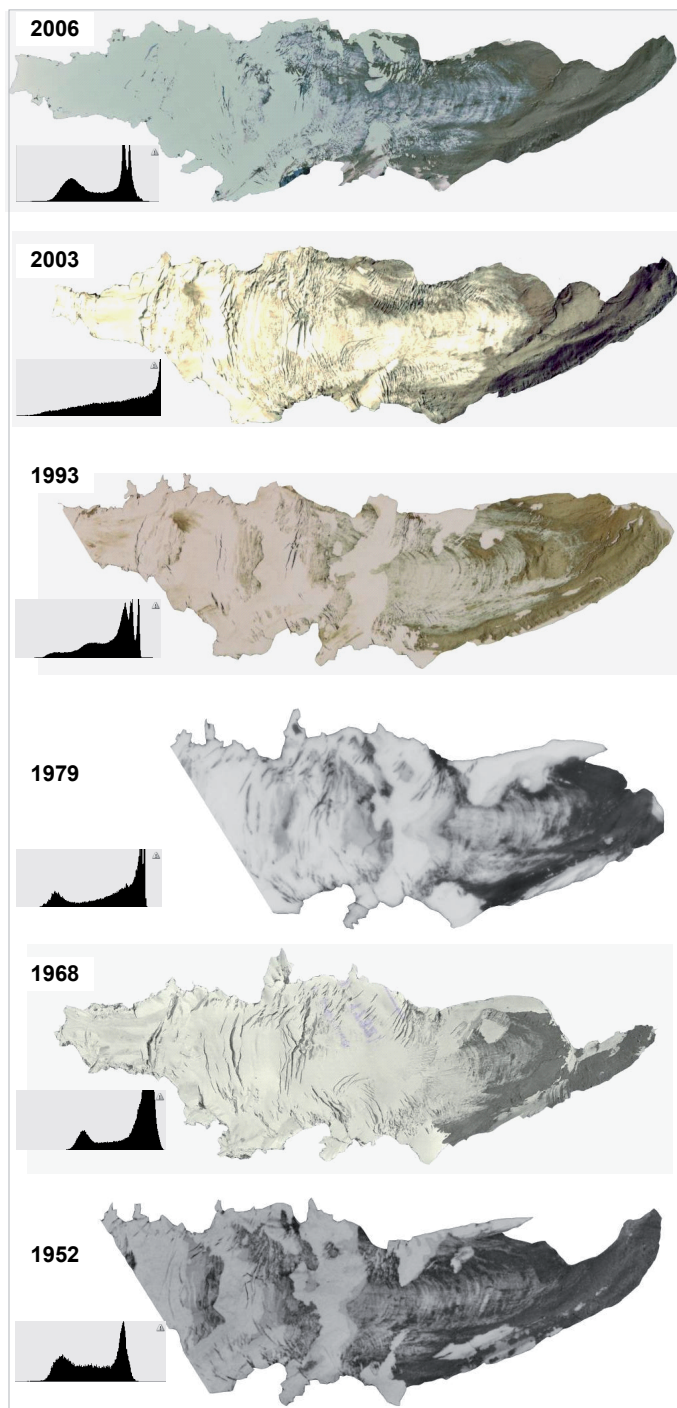


Figure 2 - Orthophotographies du glacier d'Estelette et leurs histogrammes.

les clichés aériens sont généralement pris à la fin de la saison d'ablation, et les névés présents sont alors considérés comme pérennes et inclus dans les surfaces englacées. La distinction entre couverture détritique supraglaciaire et marge proglaciaire par analyse multispectrale est rendue délicate par une réflectance identique (Paul *et al.*, 2004) et doit donc s'appuyer sur les

relevés de la position du front du glacier d'Estelette réalisés irrégulièrement par le Comitato Glaciologico Italiano (Lesca, 1953 ; 1972 ; Pantaleo, 1973), complétés par une bonne connaissance du terrain.

b - Images terrestres obliques : recadrage et superposition

L'opération de recadrage est nécessaire pour corriger les différences d'orientation et de position entre deux clichés diachroniques lorsque l'on utilise un appareil photographique non fixe. À l'aide de points communs aux photographies T1 (du 10/10/2006) et T2 (du 5/09/2007) repérés sur les parois, on délimite un secteur identique sur chaque cliché (figure 3a). Puis ces images recadrées sont superposées. Malgré le recadrage, on relève un décalage entre les deux photographies. Il est induit par l'utilisation d'un appareil photographique non fixe qui ne permet pas une orientation et une position strictement identiques lors des prises de vue, d'où des différences de déformation entre les clichés, qui dépendent également de la focale de l'appareil photographique.

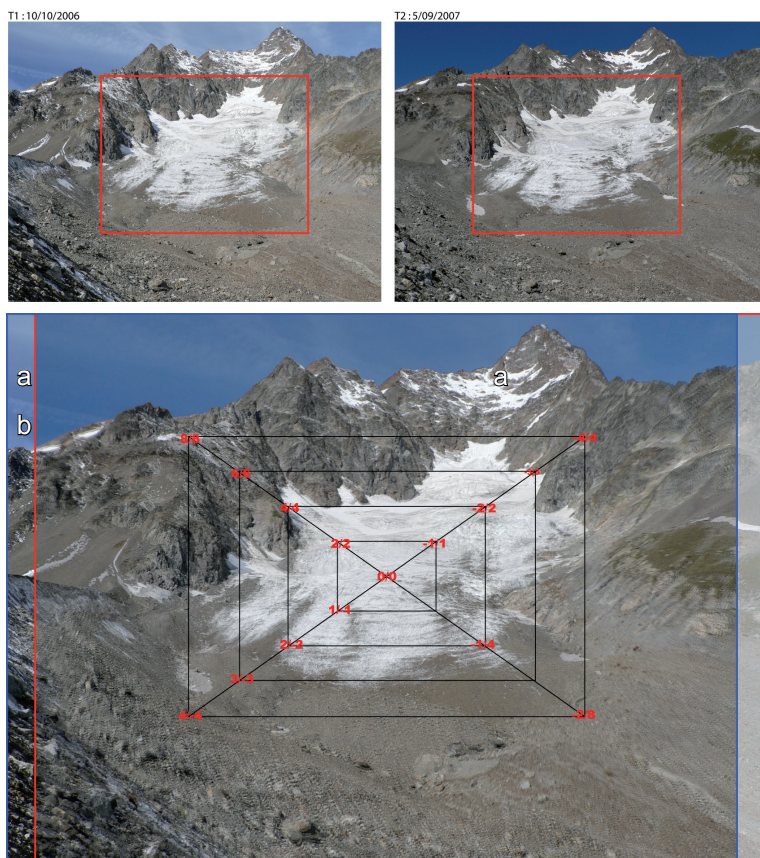


Figure 3 - Recalage (a) et superposition (b) de deux photographies obliques terrestres. Sur le glacier, l'écart de superposition est déterminé en appliquant la règle de décroissance régulière marge/centre indiquée dans le texte. Il est représenté par un couple de nombres qui correspondent respectivement au décalage horizontal et vertical (valeurs positives : décalage horizontal vers la droite et vertical vers le haut ; valeurs négatives : décalage horizontal vers la gauche et vertical vers le bas).

Ce décalage est évalué de manière théorique : selon les lois de l'optique, les déformations photographiques s'accroissent du centre de l'image vers ses marges. On suppose qu'il en est de même pour les différences de déformation entre les deux clichés. En mesurant, à l'échelle du pixel, l'écart entre T1 et T2 aux quatre coins des images et en appliquant une règle de décroissance régulière marge/centre, on obtient un modèle de déformation présentant la répartition du décalage de T2 par rapport à T1 (figure 3b). Toutefois, cette erreur de superposition n'a pu être corrigée dans cette étude, et les résultats obtenus sont donc à interpréter avec prudence. Cette méthode de photo-comparaison ouvre cependant des perspectives intéressantes, surtout si les vues sont prises par un appareil photographique fixe.

2 - Analyse colorimétrique

À l'aide des histogrammes de couleur et d'une bonne connaissance du terrain, on peut opérer une classification des pixels des images selon une gamme de trois tons associés aux états de surface du glacier : clairs (neige), moyens (glace) et foncés (couverture de débris).

a - Aérophotographies

Les trois tons sont identifiés de manière automatique à l'aide de Photoshop en utilisant la fonction *plage de couleur*. Cette fonction permet, à partir de la sélection d'un pixel, d'étendre la sélection à tous les pixels ayant une tonalité de couleur proche. Cette extension de sélection s'établit selon un indice de tolérance qui varie de 0 à 200. Pour 0, l'extension de sélection est nulle ; pour 200, elle englobe la totalité des pixels de l'image. Les histogrammes de couleur (figure 2) font ressortir deux gammes de tons : clairs pour la neige et foncés pour la couverture détritique. Chacune de ses gammes est sélectionnée à l'aide de la fonction *plage de couleur*. Les pixels qui n'appartiennent à aucune de ces deux gammes forment la gamme des tons moyens, qui correspondent à la glace. Les indices de tolérance choisis pour les sélections des pixels clairs et foncés sont respectivement 40 et 15. Le critère de choix de ces valeurs est la cohérence entre l'extension de sélection qu'elles provoquent et la surface qu'elles représentent : pour les tons clairs, l'extension de sélection doit correspondre le plus finement possible aux surfaces neigeuses, tandis que les tons foncés doivent correspondre à la couverture détritique.

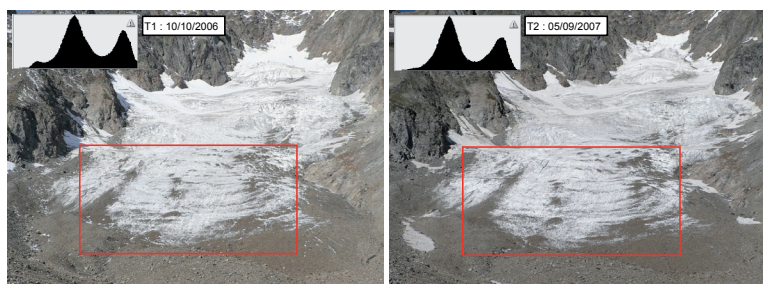


Figure 4 - Analyse colorimétrique de deux photographies obliques terrestres. Les images T1 et T2 se composent essentiellement de tons clairs et foncés. Les histogrammes présentent une allure très proche : le premier ensemble de pixels, foncés (à gauche), correspond aux surfaces rocheuses ; le second ensemble, à pixels clairs (à droite), aux surfaces de glace/neige. Le cadre rouge délimite le secteur sur lequel a été réalisé le calcul de l'accroissement de la couverture détritique (cf. tableau 2).

A cause d'artefacts, cette classification n'est pas toujours strictement associée aux différents états de surface du glacier : sur la couverture détritique, des blocs rocheux de couleur claire et des bédiers peuvent être pris pour de la glace ; sur la glace, les crevasses ont les tons sombres de la couverture détritique, tandis qu'une glace pure recouverte d'une fine pellicule d'eau a les tons clairs de la neige. Ces artefacts doivent être éliminés en classifiant manuellement les pixels concernés.

b - Images obliques

A la différence des histogrammes des aérophotographies, ceux des photographies obliques terrestres

(figure 4) se composent principalement de tons clairs (glace et neige, avec un indice de tolérance Photoshop de 40) et foncés (parois rocheuses et matériel détritique supraglaciaire). Cette distinction clair/foncé peut être brouillée par les variations de la luminosité de l'image. Pour les minimiser, les photographies sont prises les jours de beau temps, aux heures où le soleil est au plus haut. D'autre part, les tons de la glace sale s'apparentent à ceux de la couverture détritique, d'où le recours à une délimitation manuelle dans les secteurs concernés.

En raison des difficultés liées au prétraitement des images obliques, le calcul du nombre de pixels clairs/foncés ne porte que sur un secteur représentatif de la surface du glacier (figure 4), aux évolutions les plus marquées et pour lequel les erreurs sont réduites.

II - RÉSULTATS ET DISCUSSION

La photo-comparaison des images aériennes permet un suivi de l'évolution du glacier d'Estelette et de sa couverture détritique depuis 1952 (figure 5, tableau 1). Deux modalités de distribution de la couverture détritique peuvent être distinguées selon les années : en 1952, 2003 et 2006, la couverture détritique occupe 43,9 à 52,2 % de la surface des 2/3 aval du glacier. Elle couvre la partie frontale et une grande partie des marges. En 1968, 1979 et 1993, la couverture s'est contractée vers l'aval et n'occupe plus que 26,7 à 32,3 % de la surface des 2/3 aval du glacier (figure 6). Bien que la limite supérieure de la couverture détritique ne soit pas nette, il apparaît depuis 1952 une translation générale de cette limite vers l'aval en période de rétraction de la couverture et vers l'amont en période d'extension. Ces deux phases de rétraction et d'extension de la couverture détritique correspondent respectivement à des phases d'avancée et de retrait glaciaires (figure 6). Ainsi, le front des glaciers de la Lex Blanche (photo 1) et des Bossons, qui reculait depuis les années 1920, avance à partir de 1954, puis recule à nouveau depuis le milieu des années 1980 (1983 et 1986-88 pour les Bossons et la Lex Blanche, respectivement ; figure 6). Il est à noter que dans le cas du glacier d'Estelette, largement noir, ces phases glaciaires n'entraînent qu'un très faible déplacement du front. Il présente néanmoins des variations de superficie pour les 2/3 aval du glacier (en particulier sur la marge gauche de son sec-

teur frontal) : celle-ci passe ainsi de 0,44 km² en 1968 à 0,47 km² en 1993 puis 0,39 km² en 2006 (tableau 1).

La photo-comparaison des images obliques permet un suivi annuel de l'évolution de la couverture détritique (figure 7). Dans le contexte d'extension de celle-ci depuis la fin des années 1980, on observe d'une année à l'autre le déplacement des amas et bandes détritiques vers l'aval. On peut également mesurer sur un secteur représentatif de la surface du glacier (figure 6) l'accroissement de la part des débris qui ne sont pas encore intégrés à la couverture détritique continue. Cet accroissement, qui résulte de l'émersion de débris transportés dans le niveau intraglaciaire, est évalué *via* la variation du nombre de pixels à tons foncé (tableau 2). Entre octobre 2006 et septembre 2007, ce nombre, et donc la surface couverte de débris, a augmenté de 1,25 % dans ce secteur, ce qui est cohérent avec l'évolution mesurée pour la période 1993-2006.

Ces mesures par photo-comparaison sur le glacier d'Estelette valide le modèle d'expansion longue d'un glacier noir proposé par Kirkbride (2000), selon lequel l'évolution de la couverture détritique est principalement contrôlée par le signal climatique (figure 8). Lors des périodes froides, comme pendant le Petit Âge Glaciaire ou, à un moindre degré, le troisième quart du XX^e siècle, le bilan de masse glaciaire est positif, avec augmentation de la vitesse d'écoulement du glacier. Par ailleurs,

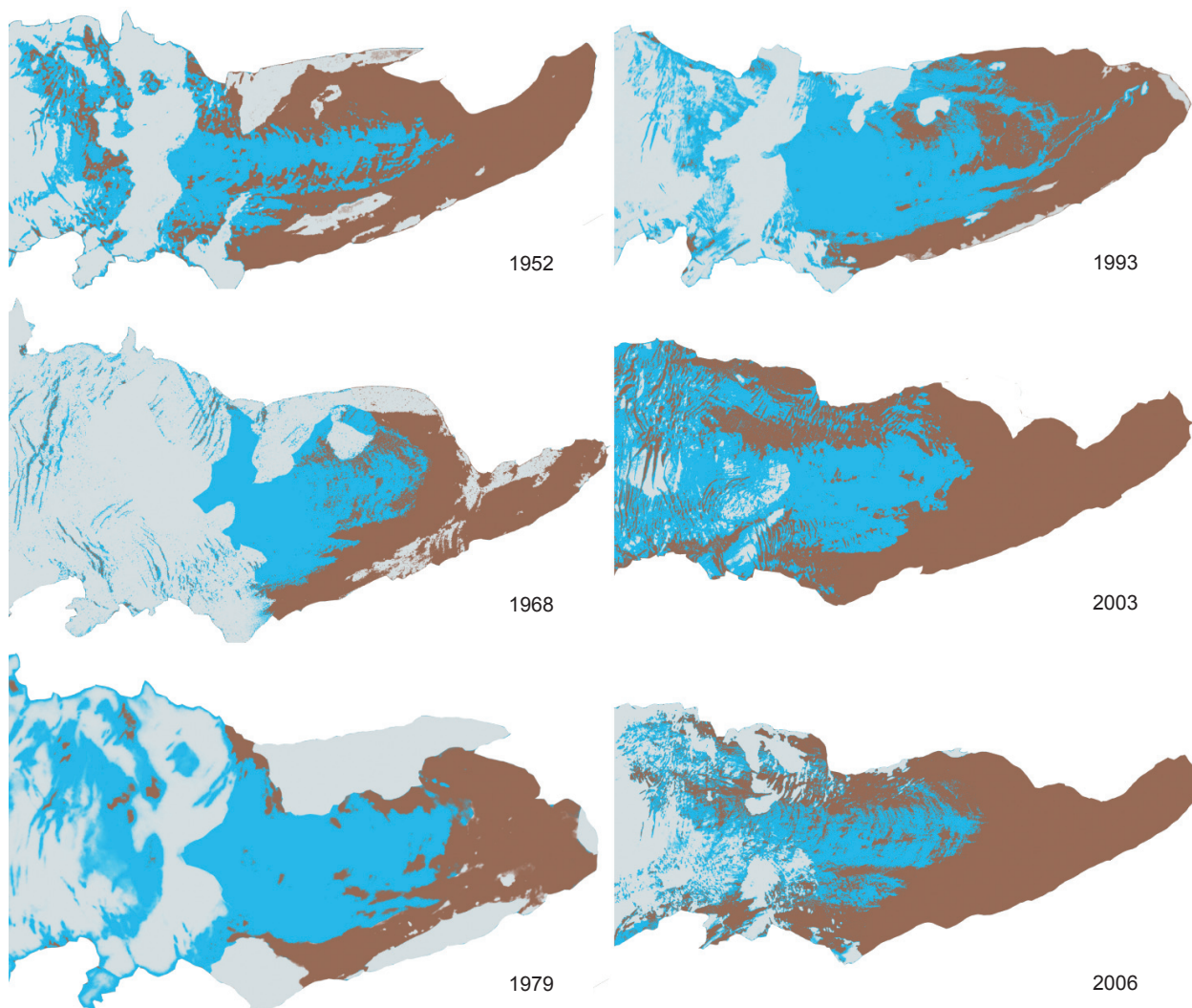


Figure 5 - Evolution de l'état de la surface du glacier d'Estelette entre 1952 et 2006.
Gris : neige ; bleu : glace ; marron : couverture détritique.

Année	surface d'un pixel (m²)	total		neige		Glace		couverture détritique		% de la superficie occupée par la couverture détritique sur les 2/3 aval du glacier
		nombre de pixel	superficie (m²)	nombre de pixel	superficie (m²)	nombre de pixel	superficie (m²)	nombre de pixel	superficie (m²)	
1952	0,662205	698098	462284	240228	159080	180952	119827	300918	202907	43,9
1968	0,534317	829673	443309	479382	256142	175249	93639	209042	118381	26,7
1979	0,388815	1137262	442184	470989	183127	405500	157664	318773	137558	31,1
1993	0,28867	1628852	470200	549018	158485	580059	167446	513775	151792	32,3
2003	0,157292	2594286	408059	190257	29926	1047885	164823	1355644	213112	52,2
2006	0,102144	3836366	391862	1002315	102381	889886	90897	1951165	200882	51,3

Tableau 1 - Evolution des composantes de la surface du glacier d'Estelette entre 1952 et 2006. Seul le secteur aval du glacier a été pris en compte (c. 2/3 de la surface totale).

la diminution de l'ablation de la glace entraîne l'arrivée d'une moindre quantité de débris d'origine intra-glaciaire à la surface du glacier. C'est la dynamique que connaît le glacier d'Estelette du milieu des années 1950 à celui des années 1980, avec en conséquence une rétraction de la couverture détritique (phase TD : transport dominant). Inversement, lors des périodes plus

chaudes comme dans les années 1930-1940 ou depuis la fin des années 1980, le bilan de masse est négatif : la vitesse du glacier diminue alors que l'ablation de la glace devient forte, d'où une expansion de la couverture détritique vers l'amont, comme sur le glacier d'Estelette pendant la période 1993-2006 (phase AD : ablation dominante).

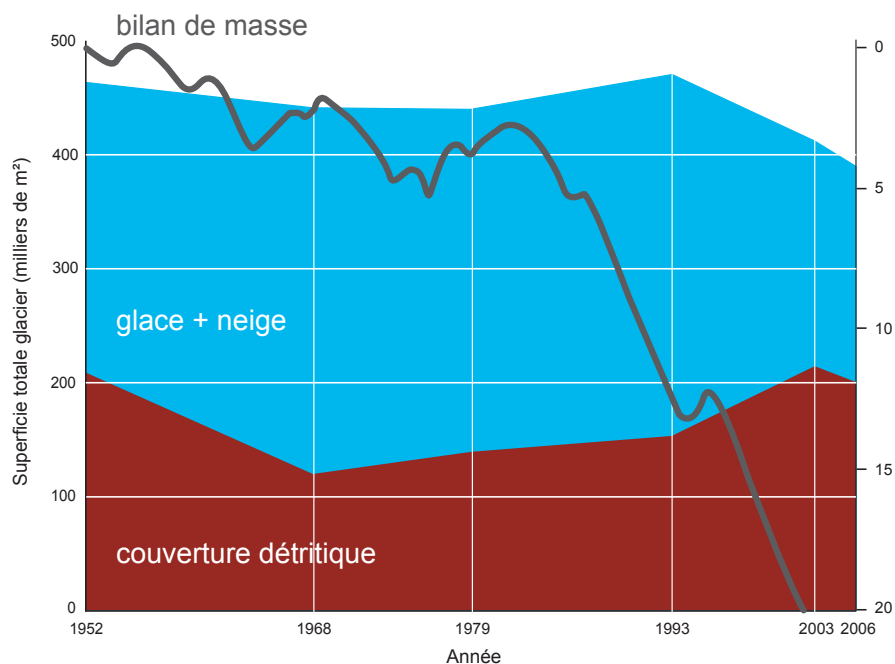


Figure 6 - Evolution des surfaces à glace/neige et à couverture détritique au glacier d'Estelette depuis 1952. Courbe : moyenne des bilans de masse glaciaires cumulés et centrés des glaciers de Sarennes, Saint-Sorlin, Argentière, Gries, Clariden et Hintereisferner (Vincent et al., 2004), exprimée en m équivalent eau par an.

Figure 7 - Evolution annuelle de la couverture détritique mise en évidence par la superposition de deux photographies obliques terrestres. L'image composée présente les modifications produites entre T1 (10/10/2006) et T2 (05/09/2007). En noir : parois rocheuses et couverture détritique aux deux dates ; en blanc : glace et neige aux deux dates ; en vert : parois rocheuses et couverture détritique le 10/10/2006 ; en orange : parois rocheuses et couverture détritique le 05/09/2007.

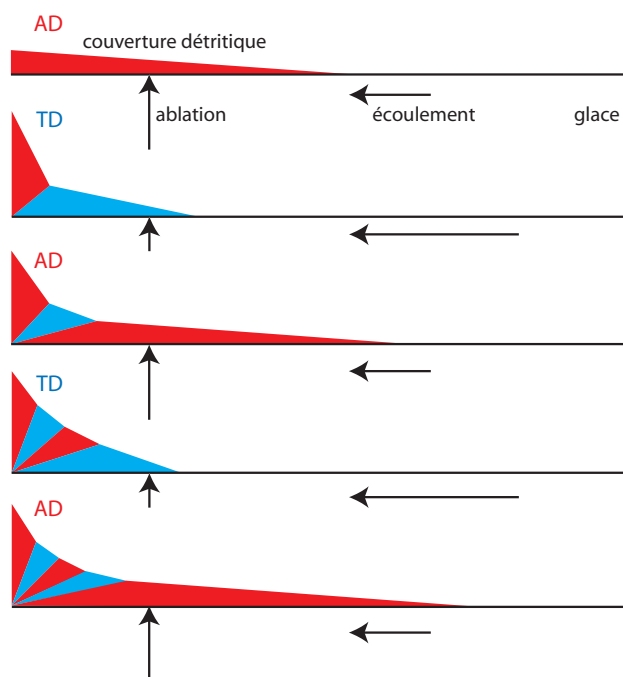
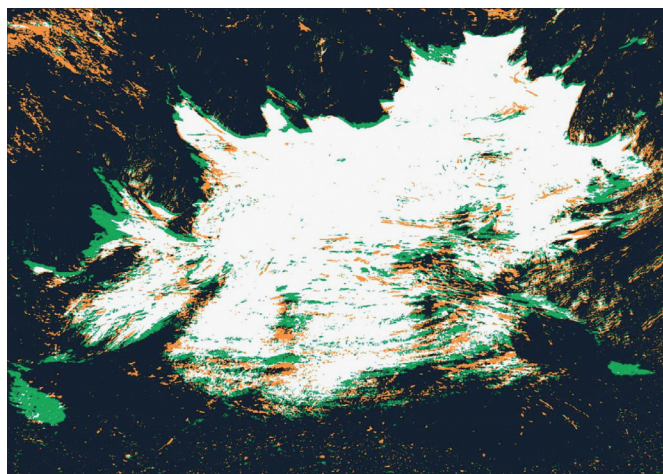


Figure 8 - Modèle d'expansion longue d'un glacier noir (Kirkbride, 2000). AD : phase à ablation dominante (rouge) ; TD : phase à transport dominant (bleu).

couleur et types de pixels	groupement de pixels	pixels
vert, débris rocheux au 10/10/2006	1240	550 659
orange, débris rocheux au 05/09/2007	1489	575 777
noir, débris rocheux aux deux dates	1658	1 293 631
blanc, glace aux deux dates	956	2 630 391
total	1	5 050 458

Tableau 2 - Bilan 2006-2007 des pixels pour les composantes de la surface du glacier d'Estelette dans le secteur étudié à partir des prises de vue obliques.

CONCLUSION

La photo-comparaison d'images numériques ou numérisées est une méthode intéressante pour reconstituer l'évolution de la surface des glaciers noirs. Lorsqu'elle se base sur le riche corpus d'aérophotographies verticales disponibles pour le massif du Mont Blanc à partir de la fin des années 1940 (Le Roy et Deline, 2009), elle permet d'établir un cadre chronologique dans lequel s'inscrivent des études sur les modalités actuelles de contrôle glaciologique de la couverture détritique (Kirkbride et Deline, en préparation). Fondée sur des photographies obliques terrestres, elle complète ces études glaciologiques en documentant les changements de surface à un pas de temps annuel.

Cette étude sur la couverture détritique d'un glacier noir, la première de ce type dans les Alpes, contient une information sur l'évolution du milieu de haute montagne dans le contexte de réchauffement actuel. Sa généralisation à plusieurs glaciers noirs (ou en train de le devenir) dans un même massif voire dans les Alpes,

aux caractéristiques différentes (longueur, superficie, pente, orientation), devrait procurer des résultats intéressants permettant de conforter ceux présentés ici.

Enfin, si l'évolution d'une couverture détritique est contrôlée principalement par le signal climatique, elle l'est également par le bilan détritique (sédimentaire) du glacier. Celui-ci correspond au rapport entre les entrées et les sorties de débris qui transitent par le glacier : un bilan détritique positif, avec des entrées (produits de l'érosion glaciaire, apports depuis les versants) supérieures aux sorties (charge solide de l'émissaire, dépôt de tills), favorise le développement de la couverture (Deline, 2002). Faute de cette prise en compte de la dynamique des parois rocheuses, le signal que constitue l'évolution d'une couverture détritique est abusivement considéré comme exclusivement glaciologique alors qu'il contient une part d'information qui, pour porter également sur l'évolution du milieu de haute montagne, concerne les processus périglaciaires (gélifraction, dégradation du permafrost).

BIBLIOGRAPHIE

- D'AGATA C., ZANUTTA A., 2007. Reconstruction of the recent changes of a debris-covered glacier (Brenva Glacier, Mont Blanc Massif, Italy) using indirect sources: methods, results and validation. *Global and Planetary Change*, 56 (1-2) 57-68.
- DELINE P., 2002. Etude géomorphologique des interactions entre écroulements rocheux et glaciers dans la haute montagne alpine : le versant sud-est du massif du Mont Blanc (Vallée d'Aoste, Italie). Thèse de doctorat, Université de Savoie, 365 p.
- DELINE P., 2005. Change in surface debris cover on Mont Blanc massif glaciers after the Little Ice Age termination. *The Holocene*, 15 (2), 302-309.
- KELLERER-PIRKLBAUER A., LIEB G.K., AVIAN M., GSPURNING, J., 2008. The response of partially debris-covered valley glaciers to climate change: the example of the Pasterze Glacier (Austria) in the period 1964 to 2006. *Geografiska Annaler*, 90 A (4), 269-285.
- KIRKBRIDE, M.P., 2000. Ice-marginal geomorphology and Holocene expansion of debris-covered Tasman Glacier, New Zealand. In Nakawo M., Raymond C.F., Fountain A. (éd.). IAHS Publication. Debris-covered glaciers. 264, 211-217.
- KIRKBRIDE M. P., DELINE P., en préparation. Glaciological controls on debris cover formation on alpine glaciers. *Journal of Glaciology*.
- LE ROY M., DELINE P., 2009. Un inventaire des aérophotographies du massif du Mont Blanc. In DELINE P. et RAVANEL L., *Collection EDYTEM*, 8, Cahiers de Géographie, ce numéro.
- LESCA C., 1953. I ghiacciai italiani del gruppo Monte Bianco. *Bolletino del Comitato Glaciologico Italiano*, 4, 62-63.
- LESCA C., 1972. La campagna glaciologica 1972. *Bolletino del Comitato Glaciologico Italiano*, 20, 129-131.
- PANTALEO M., 1973. Bibliografia analitica dei ghiacciai italiani nelle pubblicazioni del CGI. *Supplemento al Bolletino del Comitato Glaciologico Italiano*, 21, 128 p.
- PAUL F., HUGGEL C., KÄÄB A., 2004. Combining satellite multispectral image data and a digital elevation model for mapping debris-covered glaciers. *Remote Sensing of Environment*, 89 (4), 510-518.
- SMIRAGLIA C., DIOLAIUTI G., CASATI D., KIRKBRIDE M.P., 2000. Recent areal and altimetric variations of Miage Glacier (Monte Bianco Massif, Italy). In Nakawo M., Raymond C. et Fountain A. (éd.), Debris-Covered Glaciers. IAHS Publication, 264, 227-233.
- VINCENT C., KAPPENBERGER G., VALLA F., BAUDER A., FUNK M., LE MEUR E., 2004. Ice ablation as evidence of climate change in the Alps over the 20th Century. *Journal of Geophysical Research*, 109, D10104, doi:10.1029/2003JD003857.

NEIGE et GLACE de MONTAGNE

Reconstitution, dynamique, pratiques

Sommaire

Editorial
Introduction

1 - Reconstitution

- Coutterand S. *et al.* - Le lobe glaciaire lyonnais au maximum würmien : glacier du Rhône ou/et glaciers savoyards ?
- Ravanel L. *et al.* - Désenglacement du haut bassin versant du Vorz (massif de Belledonne, Isère), au Tardiglaciaire et à l'Holocène.
- Rey P.-J. - Sociétés et fluctuations du climat dans les Alpes nord-occidentales au Néolithique moyen.
- Le Roy *et al.* - Étude des fluctuations glaciaires du Petit Âge de Glace dans le Massif des Écrins : apports de la lichénométrie.
- Kirkbride M.P. - Datation des moraines holocènes d'Islande par tephrochronologie : un état de l'art.
- Le Roy *et al.* - La dendroglaciologie, ou l'apport de l'étude des cernes d'arbres pour la reconstitution des fluctuations glaciaires holocènes.
- Rabatel A. - Évolution glaciaire dans les andes subtropicales chiliennes entre 1955 et 2007 : conséquences pour la ressource en eau.
- Le Roy *et al.* - Un inventaire des aérophotographies du massif du Mont Blanc.

2 - Dynamique

- Ravanel L. - Évolution géomorphologique de la haute montagne alpine dans le contexte actuel de réchauffement climatique.
- Gruber S. - Le permafrost de haute montagne.
- Deline P. *et al.* - L'Aiguille du Midi (massif du Mont Blanc) : un site remarquable pour l'étude du permafrost des parois d'altitude.
- Saulnier G.-M. *et al.* - Un éléphant volant est-il un oiseau ? Perspectives pour l'observation hydrométéorologique des milieux de montagne.
- Jobard S. - L'instrumentation du glacier du Baounet : quels apports pour la traçabilité des mesures environnementales ?
- Moreau L. - L'exploration du cryokarst glaciaire et son intérêt scientifique pour l'étude du drainage des eaux de fonte.
- Mazué R. *et al.* - Suivi de l'évolution de la couverture detritique d'un glacier noir par photo-comparaison : le glacier d'Esteelette.

3 - Pratiques

- Paccard P. - Réchauffement climatique et ressource neige en domaines skiables.
- Gauchon C. - Les hivers sans neige et l'économie des sports d'hiver : un phénomène récurrent, une problématique toujours renouvelée.
- Laslaz L. - L'exclusion des glaciers des zones centrales des Parcs nationaux de la Vanoise et des Écrins et leur équipement pour le ski d'été.
- Cayla N. - Les sentiers d'interprétation glaciaire : des outils de valorisation différenciée des glaciers et de leur territoire.
- Lambert R. - Cartozonage : de la carte au zonage du risque avalanche.
- Moulin A. *et al.* - L'incertitude liée aux avalanches dans les Alpes du Nord : identifications et implications pour la gestion.

La «Collection Edytem»
a pour objet de mettre en avant
l'apport de la géographie, de la géologie
et des sciences de l'environnement
dans l'étude des milieux et territoires
de montagne.

Déclinée en «numéros thématiques», elle
met en avant les travaux réalisés au sein
du laboratoire Edytem et les résultats
de ses programmes et actions
de recherche.



Prix - 15 euros

ISBN 978-2-918435-00-6

